

МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ ОБЪЕКТОВ В СЛОЖНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

С. В. Кругликов

Институт математики и механики УрО РАН
Россия, 620219, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16
E-mail: svk@imm.uran.ru

Рассматривается выбор модели представления информации для задачи планирования движения группы объектов в сложных физико-географических условиях. Предложена модель, обеспечивающая единство описания организационной структуры и маршрутов движения объектов в случае ограниченных маневренных возможностей объектов.

The Internal Information Structure Modeling in Problems of Parallel Routs Planning for Team Motion in Complex Environment / S.V. Kruglikov (Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, st. S. Kovalevskoi 16, Ekaterinburg, 620219, Russia)
The problem under discussion is to choose the appropriate structure of information allowing the route planning for a team of objects with constrained dynamics. The presented model provides the unified description of organizational structure, routes and geographical objects.

Введение. В настоящее время значительную актуальность приобретает разработка алгоритмов для информационно-управляющих систем, обеспечивающих согласованное движения групп объектов, которые обладают различными схемами предварительной подготовки информации и маневренными возможностями. Математическое исследование динамики и управления многоэлементной подвижной формации с ограничением на измерения и управление [1] может опираться на результаты теории гарантированного управления и оценивания в условиях неопределенности [2]. Подобные задачи имеют большое значение для прикладных вопросов навигации и судовождения. Существенного внимания требуют вопросы распределения ресурсов оперативной памяти и синхронизации работы систем управления при определении структуры маршрутов с учетом согласованного обхода препятствий и сухопутных образований. Качественным ограничением в данном случае выступают не только возможности и архитектура сети передачи данных, но и структура внутреннего представления информации.

Поэтому одной из центральных проблем, связанных с созданием систем поддержки автоматизированного управления группой объектов [1], является разработка единой методики и модели внутренней информации о физико-географических условиях. Единая для всех объектов группы структура информационного представления позволяет с общих позиций анализировать комплекс взаимосвязанных задач, включая следующие постановки.

1. Согласование содержания и протоколов обмена информацией между организационными уровнями управляемой группы объектов, с целью обеспечения устойчивости взаимодействия между отдельными объектами.
2. Планирование маршрутов движения группы, которое осуществляется одним из объектов на заданный период времени, учитывающий дискретности обновления информации.
3. Моделирование взаимодействия симметрично организованных групп при условии, что информация участников ограничивается гипотезами об организационной подчиненности, задачах и областях возможного расположения партнеров.

Базовой задачей для планирования различных вариантов параллельного движения группы в сложных физико-географических условиях является задача прокладки маршрута. Известно несколько подходов к решению данной задачи, каждый из которых обладает своими достоинствами и ограничениями, соответствующими принятой математической модели. Интервальный анализ [3] предполагает представление сложного географического образования объединением непересекающихся прямоугольников со сторонами,

параллельными осям координат. Полученная система для представления маршрута может быть превращена в граф. Основные процедуры достаточно подробно разработаны. Существует положительный опыт практического применения. Вариационный подход, разрабатываемый в ИММ УрО РАН [4], позволяет осуществлять полномасштабное моделирование на основе анализа непрерывных конструкций, что предполагает повышенные требования к маневренности объектов.

Известна практическая реализация прокладки маршрута [5], основанная на представлении участков суши в виде комбинации множества элементарных объектов, так называемых искусственных образований. Отдельный участок суши может быть составлен из нескольких искусственных образований. Контур искусственных образований имеют несколько степеней детализации. Соответствующие участки контуров примыкающих друг к другу искусственных образований образуют контур береговой линии каждого сухопутного образования. Прокладка маршрута ведется по вершинам контуров. Соответствующие алгоритмы реализованы в программном виде и доказали практическую применимость. Применение этой модели при построении кратчайшего маршрута в ряде случаев выявило трудности, возникающие при прохождении узостей между сухопутными образованиями.

В ходе работы над задачей планирования движения группы объектов с ограниченными маневренностью [6-7] выявлена возможность описания организационной структуры группы, препятствий и маршрута движения объектов принципиально подобными моделями, основанными на понятии (*i*)-объекта, иерархической управляемой системы. При этом описание участков суши двойственно с описанием окружающих участков моря.

В работе рассматривается модель внутренней структуры информации, обеспечивающая унифицированное объектное и алгоритмическое описание объектов и согласованное с подходом объектно-ориентированного программирования. Применение модели позволяет с позиций единого формализма описывать географические условия, ситуационную обстановку; организационную структуру и задачи объектов составляющих группы.

Теоретическую основу исследования составляют достаточные условия устойчивости взаимодействия иерархических систем, аналогичных сетевым графом. Реализации неопределенных возмущений моделируются локальными сегментами, имеющими вероятностное распределение как элементы функционального пространства с мерой. Отметим, что допустимому маршруту отвечает конечная трубка траекторий, изменения сечений трубки моделируют накапливающиеся ошибки. Характеристики конкретного объекта можно учитывать за счет выбора уровня детализации описания и ограничений на рассматриваемые звенья по длине и радиусу.

Взаимодействие иерархических систем описывается структурированной дискретной последовательностью синхронизированных действий отдельных объектов согласно лексикографическому упорядочению типовых критериев эффективности: стабильность текущего состояния и/или процесса функционирования, достижение целевого терминального состояния, относительную эффективность функционирования.

Предложенная модель организации внутреннего представления информации обеспечивает согласование дискретно поступающих данных и устойчивое функционирование управляемой системы. Условия информированности участников описываются системой отображений, включающих отношения порядка и эквивалентности объектов, что определяет возможные действия.

Основные результаты. Принятая в работе модель внутренней структуры информации основана на понятии иерархической системы, (*i*)-объект.

Определение 1. Внутренне организованный (*i*)-объект $C = \{X|Q,P\}$ включает следующие уровни:

(*i*+1) телесное метрическое пространство $X = \{X,dc|O,Sc\} \subseteq U$, область локальной версии $O = \{O_0, \Delta\theta|e\theta\}$ абсолютных координат $O\theta$;

(i) Sc – строго упорядоченное множество стыков $Q=\{Q,Q\}$, где $Q=\{L(j)=\{l,r|l,a\}(j)\}$; $Q\subseteq Q\times Q$;

(i-1) $P=\{P,P\}$, где $P=[(i-1)\text{-объекты } C(G/S),j=\{X|Q,P\},j]$; структура $P\subseteq P\times P$, актуальные связи $C(G/S)j$.

Принятая математическая модель представляет собой иерархически (по уровням) организованную систему, применимую в широком классе случаев и аналогичную по структуре сетевому графу [4].

Типология (i)-объектов: $(ok=L_{kc}) X=\{X,dc|O, Sc\}$. Компонент узлов не имеет: $P=\emptyset, K=0$.

(L₀) Точка: $kc=0, CS_{0,0}=\{X|\emptyset,\emptyset\}$.

(L₁) Луч: $kc=1, m(Q)=2, CS_{1,0}=\{X|Q_1=\{L,L\},\emptyset\}$; $L=\{cc,Rmax|ec, \alpha\}$. Если $\alpha=\pi$ – квадрат, $\alpha<\pi$ – конус, сопряженный конус, поляра; $\alpha=0$ – интервал.

(L₂) Звено: $kc=2, m(Q)=4, \langle L1,L2\rangle =CS_{2,0}=\{X|QS_2;\emptyset\}$; $QS_2=\{L1,L2|I1=I2=\pm I12 \& \epsilon_+ = d(I1,I2) \geq 0\}$. сдвиг $[z1 IO- z2 IF=b\sim B z =b, B=Matr\{IO;-IF\}, b=IOIF, z=col\{z1 ; z12\}$; $z1 = z2 = \pm 1/2|b| \Phi K(Q_2)=(1,1)$.

(ok=C_K) Цепь (i-1)-объектов: $kc=2, CS_{2,K}=\{X| Q_2=\{L1,L2\}, P_K\} = (+|k) CS_2[i,2,1,D_1] (k)$; $P_K = \{S(k) = \{s,Rmax|s,\pi\}(k) | (S(k),S(k+1)) \in P \& CS_{2,0}L(S(1))=L1 \& CS_{2,0}L(S(K))=L2\}$. (всего $m(\mathbf{CA}) = kl \leq C_{kc}^2$) $P=\{Sj\} \subseteq Sc$.

$\Phi(Q_2)=CS(k)=\{2\beta, \pi/2, \phi_{oj}' l'(k)\}$: $\phi_{oj}'(k): r'(k)/r'(k+1)=1 = [1 + \text{Cos}(\alpha\phi_{oj}'=0) / \text{Sin}(\phi_{oj}')] (k)$; $l'(0) = l'(K+1) = rrTg(2\beta)$, если точка вырожденная.

(ok=C_{1,K}) – замкнутая цепь; контур K-отделимого внешнего (i+1)-объекта G, $kc=1, 2, Sc=\{cc, rc\}$, $LO=\{IO=(s1+sK)/2, Rmax rl | IO,\pi\}$; $IO = s1sK/rl, rl = |s1sK|$, $(e_z, v[IO,IF])=0 \Leftrightarrow v[IO,IF]=0 \Leftrightarrow IO = \pm IF$. ($IO=IF \& rO=rF \& IO=IF \Rightarrow LO=LF$).

(ok=D_K) Дуга $CS_2(G;K,Rmax,\alpha^*) = \Phi(Q_2)$, где $Q_2 = \langle LO,LF \rangle$ – симметричная пара. Узлы $PS = \{S(k) | 1 \leq k \leq K \leq Kmax\}$ отвечают поворотам на угол 2β , $\beta = \alpha/K$.

1. $s(k) = cc + rc \text{Cos}^{-1}(\beta) A[\beta(2k-K-1)] ec (=) s(k-1) + \lambda s(k-1)$,

$s(1) = IO + \lambda s(0), s(K) = IF - \lambda s(K+1); \lambda = Rmax rrTg(2\beta); l'(k+1) = r'(k+1)Tg(\beta)$;

2. $s(k) = A(\phi_{oj}'(k-1))s(k-1), s(0) = +IO, s(K+1) = IF$.

Тогда $\phi_{L0}(CS) = 2rr K Tg(\alpha om/K)$, $\phi_{T}(CS) = 2rrTg(\alpha om/K)$ и максимальное отклонение $\phi_E(CS) = \epsilon c(K)$ от дуги сектора, $\epsilon c(K) = \rho - rr = rr[\text{Cos}^{-1}(\alpha om/K) - 1] = 2rr[\text{Ctg}^2(\alpha om/2K) - 1]^{-1}$; убывают с ростом K. Параметры соответствующего маршрута $Lm(\alpha om, K)$, $\epsilon m(K)$; $Lm = \phi_M(CS) 2(rr-RR) K Tg(\alpha om/K) + 2RR \alpha om$, $\epsilon m = \phi_E(CS) (rr-RR)[\text{Cos}^{-1}(\alpha om/K) - 1]$ учитывают поправку $\Delta(K)$ сглаживания траектории на K поворотах, $\Delta(K) = 2RR \alpha om - 2K RR Tg(\alpha om/K)$.

При обеспечении автоматизированной подготовки управления группой объектов [9] возможно выделение отдельных задач составляющих этапы подготовки информации и реализации общей задачи. В частности, возможно выделение задачи подготовки исходных данных, которая решается априорно и обеспечивает описание структуры моря.

Задача 1. Подготовка исходных данных

Входная информация: Список элементарных объектов, определяющих препятствия.

Выходная информация: Семейство **BS** объектов (i)CS = (i){XS,PS,QS}.

Структура решения. **Блок 1.1.** Конструкция семейства **BG** объектов (i)CG = (i){XG,PG,QG}, где (i)XG охватывающее многообразие, (i)PG граф структуры препятствий, (i)QG - (Rmax,lmin) обтяжка, обобщенный контур. Параметры Rmax,lmin определяются маневренными возможностями объектов.

Блок 1.2. Конструкция семейства **BS** объектов (i)CS = (i){XS,PS,QS}, где (i)XS охватывающий шар, (i)PS - сеть, структура на основе комбинации выпуклых оболочек, (i)QS обобщенные звенья, описывающие бухты, проливы, заливы, узкости.

В соответствии с поставленной задачей движения на заранее выделенном участке сложного рельефа осуществляется выбор маршрута, пунктами поворота которого могут быть заранее построенные вершины графа.

Задача 2. Прокладка маршрута

Входная информация: Семейство **BS** объектов $(i)CS = (i)\{XS, PS, QS\}$. Начальные и конечные позиции LO, LF группы объектов.

Выходная информация: Семейство возможных маршрутов.

Структура решения. **Блок 2.1.** Конструкция области возможных маршрутов, включая охватывающий эллипс $E(LO, LF)$. Подсемейство **BS** $|E(LO, LF)$ объектов $(i)CS = (i)\{XS, PS, QS\}$, попадающих в эллипс на основе $(i)XS$. $(i)QS^*$ Обобщенные маршруты на основе информации о сетях, **PS**; основные стыки. Уточнение маршрутов **BS** $|E(LO, LF)$ и расстановка узлов на основе отдельной Т-процедуры.

Такой подход позволяет рассматривать структурированное единство оптимизационных задач оценивания и управления, которые в силу симметричности описания объектов являются дуальными. Дуальность экстремальных задач оценивания и управления [9] предполагает симметричность постановок для двойственных объектов.

Задача оценивания. Алгоритм построения стандартизованного описания ситуации двойственным графом на основе представления контурами, разработанного для комплекса подготовки картографической информации для информационно-управляющих систем.

Задача [Est.A|W|I]. Оценивание отделимого (i) -объекта суши **CG**. Найти оптимальный двойственный объект моря **CS** (**CG**).

Критерии оптимальности:

(Est.A) кратность $\min\{K|CS(G)\}$, эквивалентно минимальной длине трубки по линии центров $\min\{|CS[G;K]|\}$;

(Est.W) максимальное отклонение при заданном числе поворотов, $m(SSj) = K_j$ эквивалентно максимальной кратности **KS**; максимальной длине тугой линии центров $\max\{|CS[G;K]|\}$;

(Est.I) Эффективная дискретизация $|CS[I](G;Kef)| = \min\{D(K)/K\}$.

Задача управления. Процедура выделения допустимого маршрута, последующей коррекции и оптимизации по ряду лексикографически упорядоченных критериев при готовом представлении препятствий двойственным графом.

Задача **Con**. Управление (прокладка маршрута).

Критерий минимизации

[**Con**. A|W|I]: (**Con**.A) минимальное число K поворотов;

(**Con**.W) минимальная длина l_0 маршрута по линии центров, эквивалентно минимальному числу поворотов;

(**Con**.I) $\min\{L(K)/K\}$.

В частности, для априорного описания географических условий используется построение сопряженных экстремальных прямолинейных сетей [8], моделирующих сушу и море. Дискретная модель для пространственных объектов представляет собой иерархическое семейство графов Gi_+ : $\{G_+ = G, G_0 \subseteq G, G_+ = \{Li_0 \leq Gi_+\}\}(Gi_+)$, где семейства $G_0(Gi_+; d^*) = \{Gj_+ | d(Gi_+, Gj_+) \leq d^*\} \subseteq G$ d^* -близких графов и $G_+(Gi_+; d^*) = \{Li_0\}$ максимальных ломаных Li_0 , таких, что $Gi_+[6] = \oplus\{Li_0[4] | Li_0[4] \in G_+(Gi_+)\}$.

Мера близости графов $d(Gi_+, Gj_+) = \min(i, j) \cdot d(gi, gj) = R0^*$, минимальный радиус окружности двойного касания ребер $gi = [ai, bi]$.

Ломаная L – связный граф $st(L) \leq 2$. Связный подграф ломаной – ломаная.

Построение графа моря при заданном описании суши представляет собой экстремальную задачу на поиск сети экстремальной по d_{+z} или объему V ;

$$\min d(Gi_+, Gj_+) = \min(i_0, j_0) \{d(Li_0, Lj_0) | Lk_0 \in G_+(Gk_+)\}$$

Базовая конструкция для такого описания основана на объединении конечного числа звеньев, образованных прямолинейным сдвигом кругов при пропорциональном изменении радиуса. Следовательно, при работе в сложном рельефе можно заранее строить описание именно структуры моря и уже на выделенном графе выбирать маршрут. Вершинами графа при этом являются центры кругов отдельных звеньев из описания структуры моря.

Для учета комбинационных связей предлагается рассмотреть двойственный граф CS на основе картографической информации, предполагающей представление препятствий контурами [5] конечного графа $PG = \{PG, PG\}$.

В этом случае входная информация представляет собой массив $\{ci \mid i \leq I\} \subseteq R^2$ организованный M группами по Mm точек; $\Sigma(m)Mm = I$. Острова, искусственные образования $\{Gm \mid m \leq M\}$ описываются контурами обхода суши по граничным дугам.

(i)–объект $CG = \{Sc \mid L = \emptyset, S\}: Sc = S(c, r \geq 0 \mid e, a)$; $PG = \{PG, PG\}$:

1) $PG = \{Gm \sim CGm \mid m \leq M\}$ перечень (i-1)-объектов; 2) PG матрица инцидентности. (PR) классы: (i=2) конечный гиперграф; (i=1) граф, остров, ИО; (i=0) вершина, $p(j) = (ol, c, rc \mid j)$.

(i-1)- объект $Gm = \{S0 \mid L = \emptyset, S \sim P, P\}(m): S0(m) = \{c, r \mid e, a\}(m)$;

1) $P(m) = \{p(j) \mid j \leq Mm\} \subseteq G$; 2) матрица $P(m)$ инцидентности с 1 над главной диагональю; кратность $m(S) = Mm$; $c(m), r(m)$ – географические характеристики.

Расчетные характеристики (i)-объекта; метрики $[P(m)]$: максимальная, средняя и минимальная, $M + |0| = [\max \mid 1/Mm \mid \min]$

$[Sc]$ Центр сс. Радиус $rc \sim RM + |0| = M + |0| - \{d(cm, cj) \mid j \leq Mm\}$.

$[L]$ Линейные: Длина ребра $Lm + |0| = +|0| - \{d(cj, cj + 1) \mid j \leq Mm \ \& \ c1 = c(Mm + 1) \ \& \ c0 = c(Mm)\}$; точность $dm + |0|$ – отклонения от $Sc(cm, RM + |0|)$, $dm + |0| = M + |0| - \{d(cm, cj) \mid j \leq Mm\} - Rmax$.

$[S]$ Плоскостные: Дисперсия, эллипс рассеяния Диаметр $Dm + |0| = M + |0| - \{d(ci, cj) \mid i \neq j \leq Mm\}$, $GD + |0| = \{(i, j) \mid d(ci, cj) = Dm + |0|\}$. Отклонение от диаметра: $D \perp + |0| = M + |0| - \{\max \{ |cicj'|, |Lcicj| \} / Dm + |0| : cj' \in P(m)\}$; $(i, j) \in GD + |0|$. $[PS]$ Идентификационные: Массивы $GR + |0|$ – номеров точек, $GR + = \{j \mid d(cm, cj) > RM0\}$, $GR0 = \{j \mid d(cm, cj) = RM0\}$, $GR - = \{j \mid d(cm, cj) = RM -\}$; $mR + |0| = m(GR + |0|)$.

$[PL]$ Ситуационные: $L + |0|$, $d + |0|$; $L \mid d + |0|$. $Dm + \geq Lm +$, $Dm - \leq Lm -$.

Количественные: Масштаб объекта $n^* = \min \{n \mid rc/dn < 1\}$, связывая кратность объекта с пространственной структурой клеток, определяет количество точек отклонения, Понятие информации отвечает эффективности структурирования данных (наблюдения) и сопоставлению затрат на точность и количество параметров ситуации.

Предлагаемая модель внутренней структуры информации обеспечивает выполнение следующих условий.

1) Параметрическое согласование географических условий (G), характеристик объекта (R), систем управления (CS) и передачи данных (DS) носителей (C).

(G-R) Предположения о неопределенности: (1) потенциальная вариативность маршрутов в СФГУ. Криволинейный маршрут представим гладким сочетанием окружностей и прямых. Маневренность объекта определяют возможности рулевой машины ($RR, \alpha^*, \Delta d$) по углу и радиусу разворота, минимальной длине линейного участка Δd . Общая касательная связывает два соседних поворота, обеспечивая стабилизацию полета после переключивания рулей. $R^* = RR + \Delta d/2$.

(CS) Неопределенность позиционирования, ошибки навигации и динамики. Ограничение на радиус RS объектов моря, $Rmin \leq RS \leq Rmax$, $Rmax = \max \{R^*, R\# \}$. Здесь $Rmin$ определяется географическими условиями; $R\#$ зависит от характеристик навигационного комплекса носителя и возможного сноса объекта на максимальной дальности, $R\# = 3\sigma_{HK} + r^* Lmax$.

2) Двойственное описание на основе сегментирования и поэтапного уточнения информации об обстановке.

3) Нумерация объектов обеспечивает прямое согласование адресации в целях уточнения описания географической обстановки.

4) Гарантированная аппроксимация береговой черты учитывает источник и причину возникновения неопределенности.

5) Процедура масштабирования и уточненного описания географической обстановки работает локально при выборе и анализе точки старта.

Заключение.

Предложенная в работе модель внутренней структуры информации, основанная на иерархическом представлении объектов, допускает естественное наращивание в зависимости от изменения ситуации и может быть основой для единой методики моделирования согласованного маневрирования групп объектов в сложных физико-географических условиях.

Предложенная модель аналогична сетевому графу и применена для решения задач прокладки и отбора оптимальных маршрутов с учетом картографической информации и их последующей коррекции. Разработаны следующие процедуры

1. Алгоритм построения стандартизованного описания ситуации на основе представления картографической информации, разработанного для информационно-управляющих систем. Описание ситуации допускает согласование с международным стандартом S-57 обмена картографической информацией и унификации предоставления информации на суда.
2. Выделение допустимого маршрута, последующая коррекция и оптимизация по ряду лексикографически упорядоченных критериев при готовом представлении препятствий.
3. Динамическая коррекция с учетом устаревания информации и комбинирования препятствий. Прокладка маршрута возможна как на плоскости, так и в 3-мерной постановке. Применение алгоритмов опробовано на примере описания картографической ситуации комбинаторной аппроксимацией, в которой препятствия имеют топологию звезд.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 09-01-00223) и Программы интеграционных фундаментальных исследований УрО РАН и СО РАН «Количественный и качественный анализ эволюционных уравнений и систем управления».

Список литературы

1. Куржанский А.Б. [О некоторых новых тенденциях в современной теории управления](#)// Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Тез. докл. XI Междунар. конференции Москва, ИПУ РАН, 1 - 4 июня 2010г. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 237-238.
2. Куржанский А. Б. Избранные труды А. Б. Куржанского:/ Отв.ред. А.Н.Дарьин, И.А. Дигайлова, И.В. Рублев. – Издво МГУ, 2009. 756с.
3. Жолен Л., Кифер М., Дилдри О., Вальтер Э. Прикладной интервальный анализ. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 468 с.
4. Бердышев В. И., Костоусов В. Б. Экстремальные задачи и модели навигации по геофизическим полям. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 270 с.
5. Разработка комплекса подготовки специальной картографической информации для информационно-управляющих систем/А.Б.Шлапоберский,О.В.Ляпустина, А.А.Николаев, М.Ю.Храмов // Информ.-мат. технологии в экономике, технике и образовании. Вып. 3: Сб. материалов Междунар. науч. конф. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С.153-157
6. Кругликов С. В. О задаче математического моделирования операций соединения надводных кораблей. // Информ.-мат. технологии в экономике, технике и образовании. Вып.3. Проблемы математического моделирования и информационно-аналитической поддержки принятия решений: Сб. материалов Междунар. науч. конф. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 158-163.
7. Кругликов С.В. Об одной иерархической модели условий для задачи прокладки маршрутов// Актуальные проблемы теории устойчивости и управления: Тез.докл. Междунар. конференции. Екатеринбург, Россия, 21-26 сентября 2009г. Екатеринбург: УрО РАН. 2009. с. 98-100.
8. Иванов А.О., Тужилин А.А. Теория экстремальных сетей. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 424 стр.
9. Kruglikov S.V. On the duality of guaranteed control-estimation problems for hierarchical systems // Proc. of the 4th International Conf. Physics and Control - 2009, PhysCon2009, Italy, Catania, 1-4 Sept., 2009, P.1-5. IPACS Electronic Library <http://lib.physcon.ru/?item=1969>

